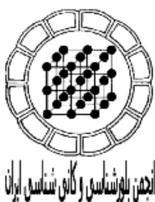
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۵، از صفحهٔ ۴۴۹ تا ۴۶۰



کانی‌شناسی و سنگ‌زایی اسکارن آهن چالو (جنوب شرق دامغان)

مریم شیبی*

دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت مقاله: ۹۴/۷/۱ ، نسخه نهایی: ۹۴/۹/۳۰)

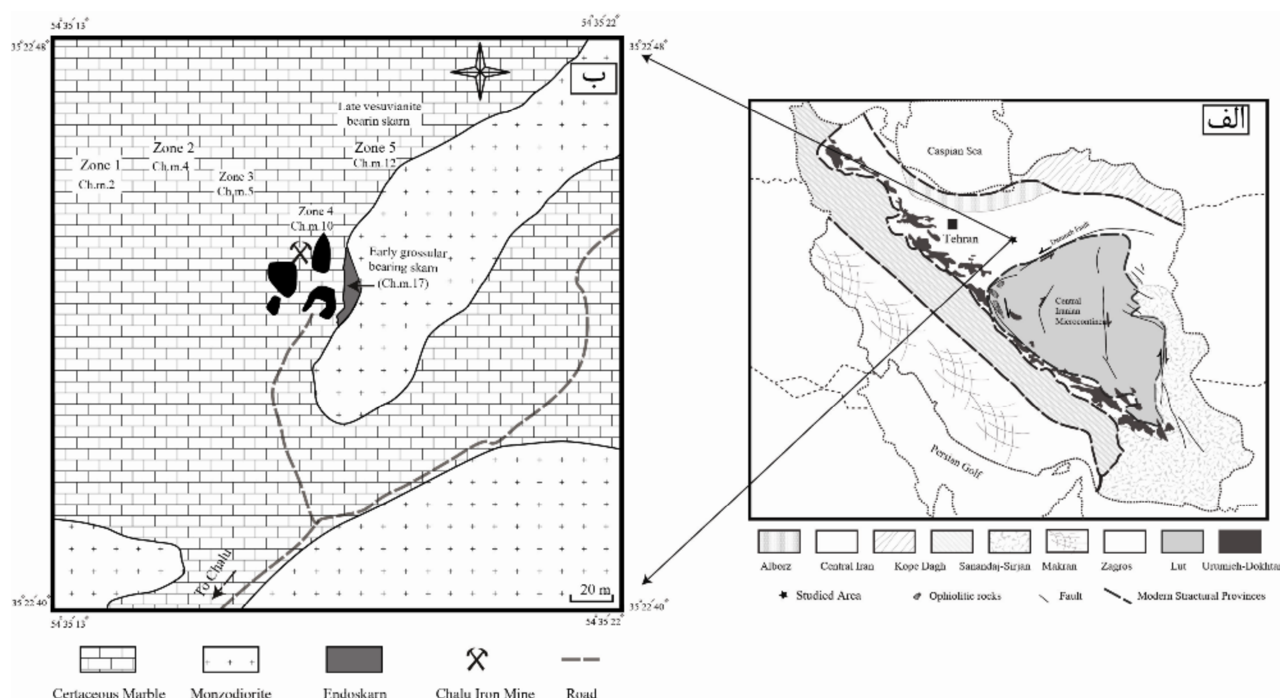
چکیده : اسکارن آهن چالو در محل تماس با سنگ‌های آهکی کرتاسه و بخشی از توده‌ی نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، به‌وجود آمده است. درون اسکارن در یک گستره‌ی باریک مشاهده شده و دارای گارنت غنی از آندرادیت ($Ad_{90}Gr_5Sp_3$) و کلینوپیروکسن است. بیرون اسکارن کلسیمی دور از محل همبری دارای منطقه‌بندی و شکل‌گیری کانیایی پیوسته بوده و از پهنه‌ی وزوویانیت و گارنت ($Ad_{53}Gr_{43}Py_2$)، درشت دانه در مجاورت توده‌ی نفوذی تا کلسیت، گارنت ($Ad_{27}Gr_{71}Py_2$)، وزوویانیت ریز دانه به دور از محل همبری تغییر می‌کند. ترکیب شیمی گارنت و وزوویانیت بخش‌های مختلف برون اسکارن، روند افزایش فعالیت CO_2 و H_2O در گرماب را همگام با کاهش دما و گریزندگی اکسیژن در مراحل مختلف تشکیل اسکارن نشان می‌دهد. کانی زایی اکسیدی و سولفیدی درونزاد بیشتر از هماتیت صفحه‌ای (اسپیکولاریت)، منیتیت توام با مقادیر کمتر پیریت، کالکوپیریت تشکیل یافته و کانه‌های برونزاد مالاکیت، آزوریت، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن را شامل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *اسکارن آهن؛ گارنت؛ وزوویانیت؛ مرمر؛ دامغان.*

مقدمه

توده‌ی گرانیتوئیدی چالو در جنوب شرق دامغان و در کویر جندق رخنمون یافته و بخش کوچکی از نوار آتشفشانی- نفوذی ترود- چاه شیرین را تشکیل می‌دهد. بخشی از این توده‌ی نفوذی با ترکیب مونزودیوریت به درون سنگ‌های آهکی کرتاسه نفوذ کرده و اسکارن آهن چالو را به‌وجود آورده است (شکل ۱). ذخیره‌ی مزبور به صورت عدسی‌های جداگانه‌ای از هماتیت و منیتیت به همراه مقادیر اندکی مس در راستای یک گسل شمال غربی – جنوب شرقی و در کنار توده‌ی نفوذی تشکیل شده است. سرشتی‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین وابسته به ذخیره‌ی آهن چالو مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. کانی‌سازی اپی‌ترمال فلزات پایه و گرانبها در ذخایر معدنی چشمه حافظ و چالو نیز با توجه به بررسی‌های کانی‌شناسی و شاره‌های درگیر بررسی شده است [۲]. همچنین سازوکار جایگیری توده‌ی نفوذی همراه با این ذخیره با استفاده از روش ناهمگنی قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (AMS) بررسی شده است [۳]. بیشتر بررسی‌های که تاکنون در این منطقه انجام شده است بیشتر روی زمین‌شناسی عمومی و شناسایی واحدهای سنگی منطقه معطوف بوده و تاکنون هیچ پژوهش جامعی روی ترکیب کانی‌شناسی، سنگ‌زایی و چگونگی تشکیل ذخیره‌ی آهن موجود، صورت نگرفته است. در این پژوهش، برای نخستین بار سنگ‌زایی و شرایط تشکیل ذخیره‌ی آهن چالو مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور از ترکیب شیمی کانی‌ها و نیز بررسی انواع دگرسانی‌ها در توده‌ی نفوذی و اسکارن موجود استفاده شده است.

*نویسنده مسئول، تلفن:۰۹۱۲۸۷۳۰۷۳۳، نمابر: ۳۲۳۹۶۰۰۷ (۲۳)، پست الکترونیکی: sheibi@shahroodut.ac.ir



شکل ۱ الف) منطقه‌های ساختاری اصلی در نقشه زمین‌شناسی ایران (تلفیقی از [۴، ۵] . ب) نقشه زمین‌شناسی گستره‌ی ذخیره‌ی آهن چالو. منطقه‌بندی اسکارن بر اساس نمونه‌های برداشت شده در صحرا، بررسی‌های سنگ‌نگاری و شیمی کانی به‌دست آمده است.

زمین‌شناسی منطقه

قدیمی‌ترین سنگ‌های گستره‌ی معدنی چالو را آهک‌های ضخیم سفید لایه تشکیل می‌دهند که ستیغ‌های بلندی را در غرب منطقه‌ی مورد بررسی به‌وجود آورده است [۶]. این واحد از آهک‌های مارنی زرد رنگ تا نخودی و شیل‌های خاکستری، با لایه‌بندی نازک تا متوسط، تشکیل شده که رنگ نمونه‌ی تازه آن خاکستری تیره است. واحد آهکی اوربیتولین‌دار با یک تداوم کامل به آهک‌های مارنی زرد رنگ و شیل‌های خاکستری می‌پیوندد که حاوی میان لایه‌هایی از آهک‌های ضخیم خاکستری است. روی شیل‌های سیلتی آهک خاکستری رنگ متمایل به آبی روشن کرتاسه بالایی، ردیفی از آهک‌های نسبتاً ضخیم لایه مطبق فسیل‌دار که در سطوح هوازده معمولاً به رنگ خاکستری تیره است، قرار می‌گیرد [۷]. گسترده‌ترین برونزدهای سنگی منطقه، به زمان ائوسن نسبت داده شده است و بیشتر از نوع آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت - داسیت هستند. توده‌های کوچکی از سنگ‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب غالب دیوریتی، که توده‌ی نفوذی مورد بررسی در این پژوهش (توده‌ی گرانیتوئیدی چالو) نیز بخشی از آن‌هاست، این مجموعه‌ی آتشفشانی را قطع می‌کنند. واحد آهکی در راستای همبری با توده‌ی نفوذی تحت تاثیر دگرگونی گرمابی و دگرنهادی قرار گرفته و آثار آن تا فواصل دورتر دیده می‌شوند.

روش پژوهش

پس از جمع‌آوری اطلاعات پیشین، به منظور بررسی‌های زمین شناسی، کل گستره‌ی معدنی چالو مورد پیمایش صحرایی قرار گرفته و بر اساس یک نمونه برداری منظم، از نمونه‌های سالم و دگرسان شده توده‌ی نفوذی، سنگ‌های رسوبی میزبان ذخیره و ماده‌ی معدنی برداشت شد. بیش از ۲۰ مقطع نازک و ۲۰ مقطع نازک- صیقلی از واحدهای متفاوت سنگی این منطقه (شامل واحد نفوذی، سنگ‌های رسوبی میزبان و ماده‌ی معدنی) تهیه و از نظر سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری بررسی شده‌اند. تجزیه‌ی شیمیایی روی برخی از کانی‌های تشکیل دهنده‌ی اسکارن موجود، با استفاده از ریزپردازنده‌ی الکترونی (مدل Cameca EPMA- SX100 فرانسه) در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد معدنی ایران انجام شده است. در طول این آزمایش‌ها، ولتاژ شتاب‌دهنده دستگاه ۱۵ kv، شدت جریان ۳۰nA و اندازه‌ی باریکه ۱ تا ۵ µm بوده است. نتایج حاصل، در برآورد چگونگی تشکیل ذخیره آهن چالو استفاده شد.

بحث و بررسی

در بررسی‌های سنگ نگاری، مونزودیوریت‌ها دارای بافت‌های ریزدانه‌ای و پورفیروئیدی بوده و بر اساس رده‌بندی [۸]، در سنگ‌های سالم پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، هورنبلند و بیوتیت، کانی‌های اساسی، پیروکسن و کوارتز کانی‌های شاخص، آپاتیت، منیتیت و اسفن کانی‌های فرعی و کلریت، سریسیت، اپیدوت و اکتینولیت کانی‌های پساماگمایی تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها هستند. این توده‌ی از نظر ژئوشیمیایی آهکی- قلیایی و شبه-آلومین بوده به گرانیتوئیدهای نوع I کمان ماگمایی تعلق دارد [۱]. با توجه به بافت نیمه عمیق توده و گسترش نسبتاً اندک هاله‌ی دگرگون مجاورتی می‌توان نتیجه گرفت که توده‌ی نفوذی در سطوح بسیار کم عمق پوسته و نزدیک به سطح زمین جایگزین شده است. همچنین در توده‌ی گرانیتوئیدی چالو، دو نوع دگرسانی گرمابی با تأثیرهای متمایز، روی داده است که با مجموعه‌ی کانی‌شناسی خاص خود قابل شناسایی‌اند.

۱- دگرسانی پروپلیتی که به صورت فراگیر و هنگام سرد شدن و مراحل نهایی انجماد ماگما، در کل توده‌ی نفوذی چالو با شدّت‌های متفاوت صورت گرفته است. این نوع دگرسانی که شامل اضافه شدن مواد فراری نظیر H_2O، CO_2 و SO_2 است از قدیم نشانه‌ای از کانه‌زایی محسوب می‌شده [۹ ، ۱۰]. این دگرسانی نخست از کانی‌های فرومنیزین شروع شد و سپس به پلاژیوکلاز و به ندرت پتاسیم فلدسپار ختم شده است به گونه-ای که هورنبلند در اثر جذب آب به اکتینولیت و کانی‌های پلاژیوکلاز و بیوتیت به اپیدوت تبدیل شده‌اند. همچنین علاوه بر کاهش در اندازه‌ی منیتیت ماگمایی، منیتیت‌های ثانویه در اثر جانشینی بخشی یا کامل کانی‌های فرومنیزین از قبل موجود (نظیر بیوتیت) نیز تشکیل شده است. ۲- دگرسانی آرژیلیکی به‌صورت محلی در حاشیه توده نفوذی و چسبیده به اسکارن مورد بررسی مشاهده می‌شود. سرشتی‌های چشمگیر این دگرسانی این است که اکثر فلدسپارها به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند. از نظر شیمیایی، این نوع دگرسانی، در شرایط اسیدی بودن نسبتاً بالا و حضور حجم زیادی آب در محیط تشکیل می‌شود [۱۱]. هنگام صعود بخارهای حاصل از سرد شدن توده‌های نفوذی در مراحل سرد شدن سریع، اسیدی شدن آن‌ها به صورت فزاینده‌ای افزایش یافته و برخورد این بخارها (HF، HCl و SO_2) با آب‌های جوی سرد باعث شسته شدن سنگ‌های اطراف و تشکیل پهنه‌ی دگرسان آرژیلیتی می‌شود. در نتیجه این دگرسانی پلاژیوکلازها و فلدسپارهای قلیایی به کانی‌های رسی (به ویژه کائولینیت) تبدیل شده‌اند. هیدرولیز شدید سیلیکات‌های آلومینیوم‌دار (محیط اسیدی) موجب تشکیل کانی‌های رسی از جمله کائولینیت می‌شود [۱۲]. این دگرسانی که پس از جایگیری توده رخ داده است با کاهش شدید در اندازه و مقدار منیتیت و هماتیتی شدن شدید در نمونه‌های برداشت شده نزدیک به آن‌ها به راحتی تشخیص داده می‌شوند. آرژیلیتی شدن شدید در بعضی از مقاطع، با حذف کامل کانی منیتیت همراه بوده و به نظر می‌رسد در پهنه‌های برشی ناشی از عملکرد گسل‌های بزرگ در منطقه و فعّالیت گرماب‌ها در راستای آن‌ها رخ داده است. شکستگی‌ها موجب چرخش و نفوذ بیشتر گرماب‌ها می‌شود و انحلال Fe^{+3} در حضور گرماب‌های اسیدی با$PH<3$ صورت گرفته است. در نتیجه باعث تشدید دگرسانی و ایجاد هاله‌ی دگرسانی نزدیک به سنگ دیواره می‌شود [۱۳]. شواهد سنگ نگاری و جزئیات بیشتر از این دو نوع دگرسانی در [۳] ارائه شده‌اند.

کانه زایی

معدنکاری در چالو به شکل‌های روباز و نعل اسبی در دو سینه کار جدا صورت گرفته است. گستره‌ی نخست در شمال و شمال خاوری منطقه با کانه زایی آهن - منگنز و گستره‌ی دوم در جنوب منطقه و پیرامون معدن متروکه‌ی اصلی چالو همراه با کانه زایی مس- طلا است. کانه‌زایی رگه‌ای مس – طلای جنوب چالو بررسی شده است [۲] ولی هیچ مطالعه‌ای روی بخش کانه‌زایی آهن این پژوهش انجام نداده‌اند. کانی‌سازی آهن در گستره‌ی معدنی چالو در همبری توده‌ی نفوذی با آهک‌های کرتاسه به صورت عدسی‌های جداگانه‌ای از هماتیت ورقه‌ای (اسپکیولاریت) با جلای فلزی و خاکستری- نقره‌ای در زمینه‌ای از بلورهای کوارتز و کلسیت دیده می‌شوند (شکل ۲ الف). این کانی بیشتر از ۸۰ درصد کل کانه‌زایی را به خود اختصاص می-دهد. اندازه‌ی سوزن‌های زیبای اسپکیولاریت در نمونه‌های دستی به ۲- ۳ میلیمتر می‌رسد. منیتیت از دیگر کانه‌های اصلی این کانسار محسوب می‌شود (شکل ۲ ب). این کانی در بیشتر موارد به‌صورت توده‌ای و گاهی به‌صورت ریز دانه میکروکریستالین دیده می‌شود. کالکوپیریت و پیریت به صورت دانه‌های پراکنده (در مجموع کمتر از ۵ درصد کل کانه زایی) و همراه با هماتیت حضور دارند (شکل ۲پ)، ولی جایی که انباشت آن‌ها بیشتر است، شکل هندسی رگه‌ای دارند. در این تصویر بلور کالکوپیریت از حاشیه به گوتیت تبدیل شده است.



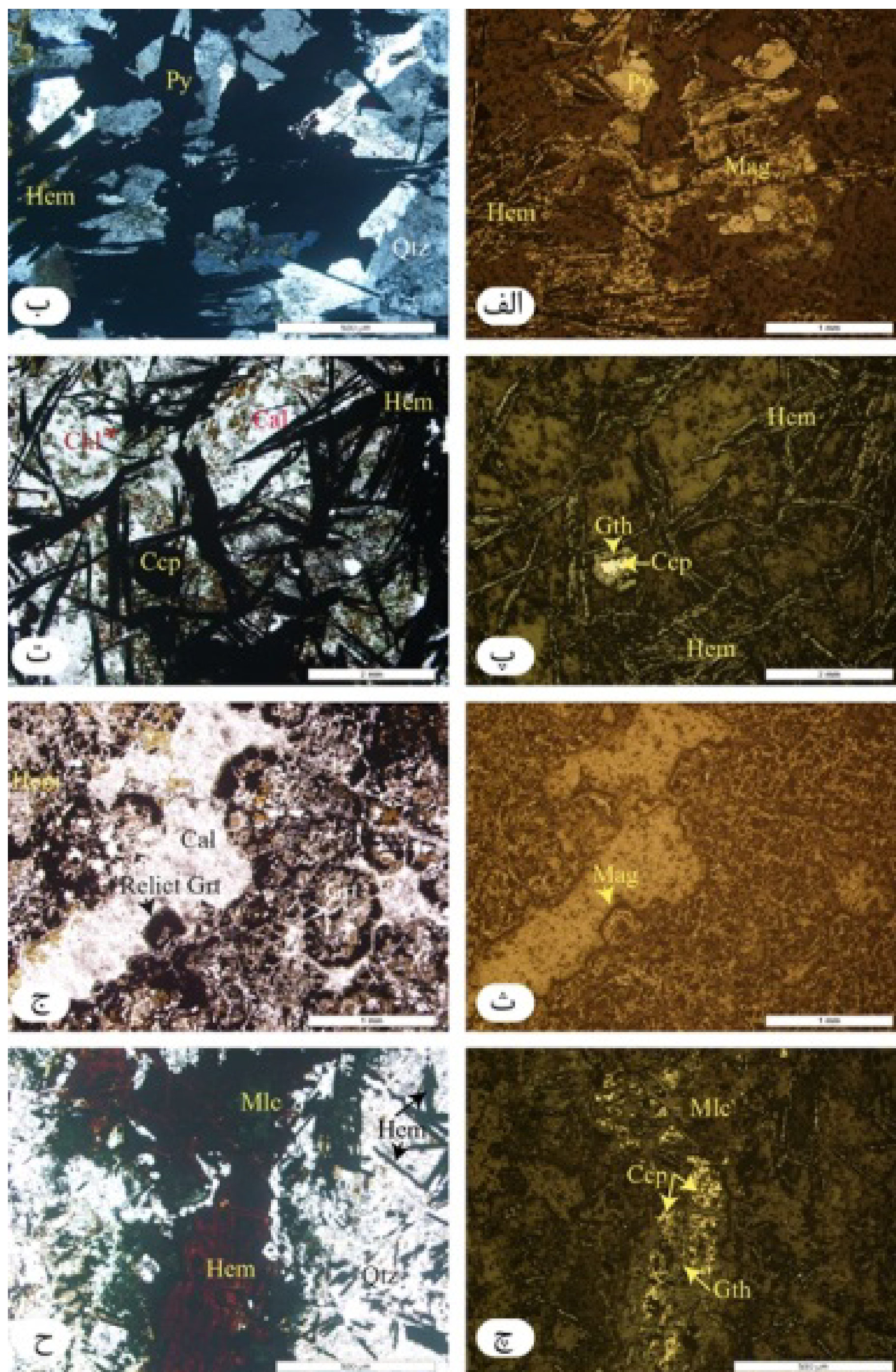
شکل ۲ تصاویر نمونه دستی و صحرایی از انواع کانی‌زایی در ذخیره آهن چالو. الـف) کانـه‌زایـی هماتیـت ورقـه‌ای بـه‌صـورت بلورهـای صـفحه‌ای اسپکیولاریت (Hem) و کوارتز (Qtz). ب) اجتماع بلوری یا پوسته‌ای مالاکیت (Mlc) همراه با منیتیت (Mag)کالکوپیریت و کلـسیت در حفـرات؛ پ) هماتیت لیمونیتی شده (Li) و بلورهای کلسیت (Cal) در حفرات؛ ت) کانه‌زایی آهن در راستای لایه بندی توف‌های کربناتی (ساخت نـواری). مخفف کانی‌ها از [۱۴].

کربنات‌های مس، از جمله مالاکیت و آزوریت بیشتر بـه صـورت پرکننده فضاهای خالی در ذخیره مشاهده می‌شوند. این کانی‌ها در بخش‌های سطحی و هوازده ذخیره شده و به‌صـورت قـشری روی ماده‌ی معدنی وجود دارند (شکل ۲پ). لیمونیت، اکـسید آهن آبدار به رنگ زرد مایل به قهوه‌ای است که غالباً در بخـش-های سطحی معدن (برونزاد) دیده می‌شود (شکل۲ پ). ساخت و بافت نواری در منطقه‌ای واقع در جنوب غرب ذخیره، خارج از گـستره‌ی مـورد بررسـی و در همبـری تـوده‌ی نفـوذی، دیـده می‌شود. نوارهای یادشده شامل تنـاوبی از منیتیـت، متـاتوف و متاسیلتستون به ضخامت بین ۱ تا ۲۰ سانتی‌متر اسـت (شـکل ۲ت). رگه‌هایی از کلسیت کـه بـه نظـر مـی‌رسـد در یـک فـاز تأخیری در منطقه ایجاد شـده، معمـولاً رگـه‌هـای سیلیـسی را همراهی می‌کنند. این رگه‌ها، بر خلاف رگه‌های سیلیـسی فاقـد کانی‌سازی هستند.

در اغلب مقاطع نازک- صیقلی بررسی شده، بلورهای تیغـه-ای و شعاعی اسپکیولاریت کانه اصلی است (شـکل‌هـای۳ الـف، ب، پ و ت) که به‌صورت انبوهه‌هـای شـعاعی (دم جـارویی) از تیغه‌های اره مانند هماتیت به رنگ خاکستری روشن در زمینه-ای از کوارتز و کلسیت مشاهده می‌شود. همرشدی این کانی بـا منیتیت در برخی از مقاطع می‌تواند نشانه‌ای از تشکیل همزمان آن‌ها باشد. بلورهای منیتیت غالباً نیمه شکلدار و پراکنـده دانـه هستند. گاهی بلورهای منیتیت در قالب بلورهای گارنت تشکیل شده و بافت جانشینی (برجای مانده) را به نمـایش مـی‌گذارنـد (شکل ۳ ث و ج). کانه‌های اصلی هماتیت و منیتیت این ذخیره در مواردی به‌وسیله‌ی رگه‌های سولفیدی (کالکوپیریـت و کمـی پیریت)، و یا رگه و رگچه‌های کوارتز- کربنـاتی تـأخیری قطـع شده‌اند (شکل ۳ پ و ت). در برخی مقاطع کالکوپیریت نیـز بـا هماتیت همرشدی داشته و تحت تـاثیر فراینـدهای سـطحی از حاشیه به کانی‌های مالاکیـت و گوئتیـت دگرسـان شـده اسـت (بافت بازماندی، شکل ۳ چ و ح). مالاکیـت در مقـاطع نـازک - صیقلی به رنگ سبز مایل به زرد بـوده و دارای بازتـاب داخلـی سبز است. فازهای سولفیدی موجود در رگه و رگچه‌ها، به‌صورت یک فاز بعد از منیتیت، تشکیل شده‌اند.

پهنه‌بندی اسکارن

درون اسکارن به بخشی از توده‌ی نفوذی محدود می‌شود که بـه واسطه‌ی فرایند دگرگـونی، ترکیـب کـانی‌شناسـی و بـافتی آن تغییر یافته است.

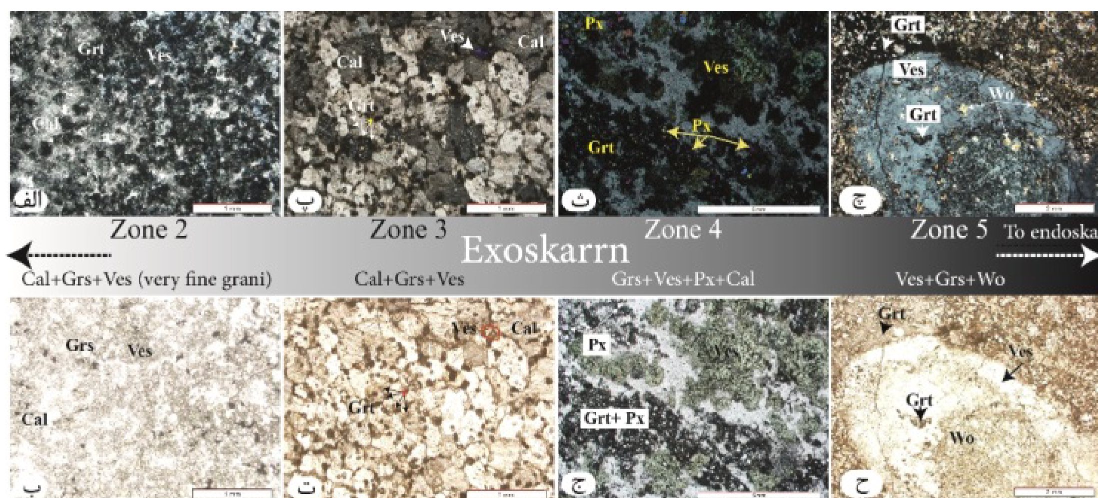


شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از انواع کانه و باطله‌های موجود در ذخیره‌ی آهن چالو. الف) کانه‌زایی هماتیت (Hem) به صورت بلورهای صفحه‌ای اسپکیولاریت همراه با منیتیت (Mag) و پیریت (Py)؛ در این تصویر دو کانی منیتیت و هماتیت همرشدی دارند (نور بازتابی، XPL). ب) تصویر الف در نور عبوری (XPL) که در آن بلورهای کوارتز (Qtz) میزبان کانه به خوبی مشخص است؛ پ) انباشت‌های شعاعی (و جارویی) از تیغه‌های هماتیت (اسپکیولاریت) به رنگ خاکستری روشن. در این تصویر بلور کالکوپیریت (Ccp) از حاشیه به گوتیت (Gth) تبدیل شده‌اند (نور بازتابی، XPL)؛ ت) تصویر پ در نور عبوری (XPL). در این تصویر کلسیت میزبان کانه‌زایی است. ث) بقایای گارنت که با منیتیت جایگزین شده است (نور بازتابی، PPL)؛ ج) تصویر ث در نور عبوری (PPL)، گارنت‌های خودشکل (Grt) با ادخال‌های فراوان منیتیت در زمینه‌ای از کلسیت. چ) کانی دارای بافت شبکه‌ای هماتیت حاوی لکه‌هایی از کالکوپیریت. در این تصویر بقایای کالکوپیریت به‌صورت هسته‌هایی در داخل آن به چشم می‌خورد (نور بازتابی، XPL)؛ ح) تصویر چ در نور عبوری (PPL)،کانی سبز رنگ‌مایل‌به‌زرد و دارای بازتاب داخلی سبز مالاکیت است. مخفف کانی‌ها از [۱۴].

در توده‌ی نفوذی چالو، درون اسکارن با دگرسانی نوع فراپهنه‌ای در بخش‌های مرکزی تا نزدیک به حاشیه‌ی توده نفوذی شروع شده و در نهایت به هاله‌ی باریکی از گارنتیت توده‌ای قهوه‌ای رنگ و کمی کلینوپیروکسن (احتمالاً دیوپسید) در برخوردگاه مرمرها ختم می‌شود. در بخش‌هایی از این پهنه، گارنت با مقادیر اندکی از کوارتز، منیتیت، کلریت و کلسیت که فراورده‌های دگرگونی قهقرایی هستند، همراهی می‌شوند. به واسطه‌ی تاثیر گرمای توده‌ی نفوذی، آهک‌ها تا فاصله زیادی از محل همبری تبلور دوباره یافته و بافت اولیه آن‌ها از بین رفته است. در صحرا، برون اسکارن دارای پهنه‌بندی بوده و در مجاورت با توده‌ی نفوذی با انباشت‌های بلورهای درشت و زیبای وزوویانیت در زمینه‌ای از گارنت‌های سبز روشن تا زرد خودنمایی می‌کند. بر اساس بررسی‌های صحرایی، سنگ نگاری و شیمی کانی، دنباله‌ی پهنه‌بندی زیر در برون اسکارن شناسایی شده است (شکل‌های ۱و ۴). ۱) پهنه‌ی کلسیت ± کوارتز: این مرمرها در مقاطع میکروسکوپی عمدتاً (بیش از ۹۰٪) حاوی بلورهای ریز تا درشت کلسیت و مقادیر اندک کوارتز هستند. در واقع این بخش از اسکارن که در دورترین فاصله از توده‌ی نفوذی قرار دارد دارای بافت گرانوبلاستیک ریز دانه ایست. ۲) پهنه‌ی کلسیت + گروسولار ± وزوویانیت بیشتر ریز دانه‌ای هستند. با نزدیک‌تر شدن به توده نفوذی، بلورهای کلسیت چند ضلعی کمی درشت‌تر شده و بافت موزائیکی را به نمایش می‌گذارند. در مقایسه با منطقه‌ی قبلی، کلسیت به ۶۰ درصد کاهش یافته است. در مرز بین بلورهای آن نیز، کانی‌های بسیار کوچک گارنت و مقادیر اندک وزوویانیت به صورت میان روزنه‌ای (Interstitial) مشاهده می‌شوند (شکل ۴ الف و ب). اگر چه اندازه‌ی کوچک دو کانی اخیر مانع از شناسایی آن‌ها در زیر میکروسکوپ می‌شود، ولی بررسی‌های تجزیه نقطه‌ای، حضور آن‌ها را اثبات کرده است. ۳) پهنه‌ی کلسیت درشت دانه + گروسولار + وزوویانیت: مجموعه‌ی کانیایی موجود در این پهنه به دلیل نزدیکی و همبری با توده‌ی نفوذی نسبت به پهنه قبلی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای درشت‌تر بوده و سرشتی‌های نوری خود را به نمایش می‌گذارند. به همین دلیل در زیر میکروسکوپ به آسانی قابل تشخیص هستند (شکل ۴پ و ت). در این پهنه نیز از درصد فراوانی کلسیت کاسته و به گارنت و ولاستونیت افزوده شده است. ۴) پهنه‌ی گروسولار + وزوویانیت ± پیروکسن: این پهنه گسترش اندکی داشته و از مجموعه کانی‌های گارنت (۳۰ درصد)، وزوویانیت بی‌شکل با رنگ تداخلی غیرعادی (۳۵ درصد) و کلسیت (۱۰ درصد) تشکیل شده است. پیروکسن (۵ درصد) به‌صورت بلورهای مجزای کوچک و یا نفوذی‌هایی با رنگهای تداخلی متوسط در انباشتی از گارنت‌های ریز مشاهده می‌شوند (شکل ۴ث و ج). ۵) پهنه‌ی وزوویانیت+ گارنت±ولاستونیت: در این پهنه که به بخش غربی گستره‌ی مورد بررسی محدود می‌شود بلورهای تماشایی و بزرگ وزوویانیت با قطر بیشتر از دو سانتی‌متر مشاهده می‌شوند. این کانی در نمونه‌ی دستی ظاهری شفاف، جلای شیشه‌ای و رنگ سبز داشته و در بیشتر موارد به صورت توده‌های تک کانیایی مشاهده می‌شود. در مقاطع نازک به صورت پورفیروبلاست‌های خودشکل و گاهی بی‌شکل درشتی با فراوانی ۷۰ درصد یافت می‌شوند که به جای کلسیت و گارنت نشسته‌اند. این کانی رنگ‌های تداخلی پایین (خاکستری سری اول) داشته و با ظاهری پوئی کیلوبلاست حاوی نفوذی‌هایی از گارنت و ولاسونیت است (شکل ۴چ و ح). کانی ولاستونیت به صورت دانه‌های بسیار ریز در زمینه‌ی این سنگ‌ها و نیز به صورت نفوذی در درشت بلورهای وزوویانیت مشاهده می‌شود. بر اساس روابط بافتی یعنی فزون رشدی، وزوویانیت پیرامون گارنت‌های همسانگرد و کلینوپیروکسن از یک طرف و حضور باقی مانده‌های گارنت و کلینوپیروکسن، به صورت چادوکریست (Chadocryst) در ایکوکریست‌های (Oikocrysts) وزوویانیت می‌توان ادعا کرد که وزوویانیت‌ها فاز تاخیری بوده و به خرج دو کانی یاد شده تشکیل شده‌اند. کلسیت، کوارتز و کلریت برخی از مهم‌ترین کانی‌های فرعی این منطقه‌ها محسوب می‌شوند.

شیمی کانی

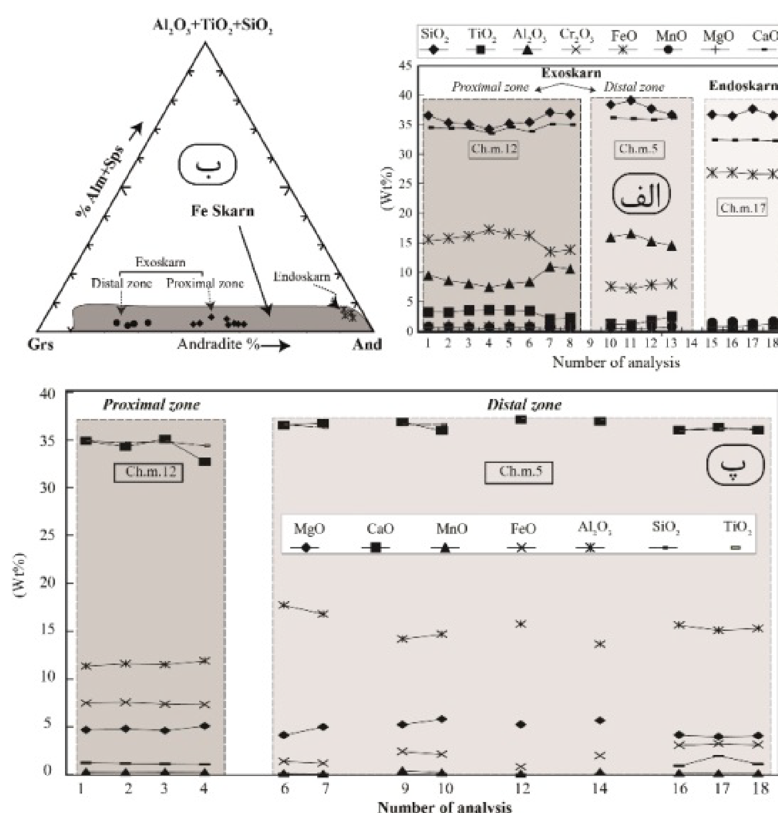
کانی‌شناسی اسکارن در شناخت خاستگاه و سنگ‌زایی اسکارن‌ها اهمیت زیادی دارد. براین اساس تعداد چهار نمونه از بخشهای مختلف اسکارن چالو برای بررسی شیمی کانی انتخاب شدند. نتایج تجزیه شیمیایی برخی از کانی‌های موجود در اسکارن چالو در جدول ۱ آورده شده‌اند. گارنت و وزوویانیت ترکیب شیمی نسبتا یکسانی دارند و تمایز اساسی ایندو حضور Mg و OH در وزوویانیت است (جدول ۱). **گارنت**: شکل ۵ الف نمودار تغییرات درصد وزنی اکسیدهای موجود در گارنت‌های تجزیه شده در بخش‌های مختلف اسکارن آهن چالو (درون اسکارن و برون اسکارن) را نشان می‌دهد. پهنه‌ی درون اسکارن دارای گارنت نوع آندرادیتی است.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از کالک سیلیکات‌های موجود در اسکارن آهن چالو. این تصاویر بر حسب فاصله از محل همبری با توده‌ی نفوذی مرتب شده و دنباله‌ی پهنه‌بندی را به نمایش می‌گذارند. الف) مرمر ریز دانه حاوی کانی‌های گارنت (Grt) و مقادیر اندک وزوویانیت (ves) بسیار کوچک و بی‌شکل در میان دانه‌های چند ضلعی کلسیت (نور عبوری، XPL). کانی‌های موجود در این تصویر با استفاده از روش تجزیه‌ی نقطه‌ای شناسایی شده‌اند. ب) تصویر الف در نور عبوری (PPL)؛ پ) مرمر کلسیتی دارای گارنت همسانگرد و وزوویانیت (Ves). در این تصویر کانی‌ها با استفاده از سرشتی‌های نوری خود به راحتی قابل تشخیص‌اند (نور عبوری، XPL)؛ ت) تصویر پ در نور عبوری (PPL). ث) گارنت، پیروکسن (Px) و ووزیانیت (نور عبوری، XPL)؛ ج) تصویر ث در نور عبوری (PPL). چ) فنوبلاست‌های وزوویانیت (Ves) حاوی نفوذی‌هایی از گارنت و ولاستونیت (Wo). زمینه‌ای اطراف این فنوبلاست‌ها نیز از گارنت و مقادیر اندک پیروکسن تشکیل شده است (نور عبوری، XPL) . ح) تصویر چ در نور عبوری (PPL). مخفف کانی‌ها از [۱۴].

از آنجا که گارنت‌های تجزیه شده بسیار کوچک‌اند، الگوی منطقه‌بندی خاصی برای بلورهای مورد بررسی به‌دست نیامد، ولی ترکیب شیمی کلی گارنت‌های موجود در بخشهای مختلف ذخیره (درون اسکارن و برون اسکارن) از نظر ترکیبی تفاوت‌هایی را به نمایش می‌گذارند. بیشترین تغییرات وابسته به اکسیدهای CaO، FeO، Al_2O_3، TiO_2 و SiO_2 است که بر حسب محل رخنمون این کانی متفاوت است. گارنت درون اسکارن بالاترین میزان FeO و MnO را در مقایسه با گارنت‌های برون اسکارن به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۵الف). در برون اسکارن، گارنت‌ها وابسته به سری گراندیت، با ترکیب گروسولار - آندرادیت بوده (جدول ۱) و FeO و TiO_2 بالاتری در پهنه‌ی نزدیک به محل همبری (Proximal zone) و CaO و Al_2O_3 بیشتری در فواصل دورتر (Distal zone) دارند. در واقع، میانگین گارنت موجود در درون اسکارن دارای ترکیب $Ad_{90}Gr_5Sp_3$ است در حالی که این کانی در برون اسکارن از $Ad_{27}Gr_{71}Py_2$ در پهنه‌ی ۲ (مرمر کلسیتی حاوی گارنت و وزوویانیت ریز دانه) تا $Ad_{53}Gr_{43}Py_2$ در پهنه‌ی ۵ (وزوویانیت+ گارنت±ولاستونیت) نزدیک به محل همبری تغییر می‌کند (جدول ۱). در نمودار آندرادیت - گروسولار – اسپسارتین، گارنت‌های درون اسکارن و برون اسکارن چالو بر حسب موقعیت خود نسبت به توده‌ی نفوذی در گستره‌های جداگانه‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۵ ب). همچنین در این نمودار نتایج بدست آمده از تجزیه‌ی نقطه‌ای کانی گارنت در گستره‌ی ترکیب این کانی در اسکارن آهن جای می‌گیرند [۱۵].

وزوویانیت: اگر چه این کانی در زیر میکروسکوپ رنگ‌های تداخلی ضعیف سری اول و در مواردی رنگ‌های تداخلی غیرعادی نشان می‌دهد، ولی هیچ نشانه‌ای از تناوب رنگ‌های تداخلی و منطقه‌بندی ترکیبی وجود ندارد. نتایج تجزیه‌ی شیمی بلورهایی از این کانی نیز این ادعا را تائید می‌کند. به طور کلی این کانی محتوای MgO با میانگین ۵wt% و MnO<۰/۱wt% دارد (جدول ۱). محتوای آهن و منیزیم در این کانی نیز به طور معکوس تغییر می‌کنند (شکل ۵پ). همگام با تغییرات ترکیب کانی‌شناسی گارنت‌های برون اسکارن، یک کاهش عمومی در FeO و TiO_2 و افزایش در SiO_2 و Al_2O_3 از وزوویانیت موجود در پهنه‌ی ۵ (وزوویانیت+ گارنت) نزدیک به محل همبری به سمت پهنه‌ی ۲ (مرمر کلسیتی دارای گارنت و وزوویانیت) به دور از محل همبری مشاهده می‌شود.



شکل ۵ نمودار تغییرات درصد اکسیدهای موجود در گارنت (الف) و وزوویانیت (پ) تجزیه شده در آهن چالو. در این دو نمودار محور x معرف شماره‌ی نقاط تجزیه شده است. ب) موقعیت ترکیبی گارنت‌های تجزیه شده موجود در اسکارن روی نمودار سه‌تایی آندرادیت- گروسولار- (اسپسارتیت + آلماندین). گستره‌ی خاکستری نشانگر موقعیت ترکیبی گارنت در اسکارن‌های آهن جهان [۱۵].

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمی کانی‌های گارنت و وزوویانیت موجود در ذخیره آهن چالو

Garnet	Exoskarn												Endoskarn			
Skarn	Proximal Zone								Distal Zone							
Sample no.	Ch.m.12								Ch.m.5				Ch.m.17			
#	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
SiO_2	۳۶٫۵۳	۳۵٫۲۹	۳۵٫۱۰	۳۴٫۲۱	۳۵٫۱۷	۳۵٫۳۹	۳۷٫۰۳	۳۶٫۷۱	۳۸٫۳۶	۳۹٫۰۸	۳۷٫۶۷	۳۶٫۶۶	۳۶٫۶۷	۳۶٫۴۵	۳۷٫۶۵	۳۶٫۵۴
TiO_2	۳٫۲۳	۳٫۲۰	۳٫۵۳	۳٫۵۹	۳٫۵۵	۳٫۴۴	۲٫۰۴	۲٫۲۳	۱٫۱۹	۱٫۰۸	۱٫۸۱	۲٫۴۷	۰٫۰۲	۰	۰	۰٫۰۳
Al_2O_3	۹٫۴۶	۸٫۵۷	۸٫۰۷	۷٫۴۶	۸٫۰۶	۸٫۳۷	۱۰٫۹۹	۱۰٫۵۴	۱۵٫۹۴	۱۶٫۵۳	۱۵٫۲۱	۱۴٫۵۱	۰٫۸۵	۰٫۷۸	۰٫۹۹	۱٫۱۹
Cr_2O_3	۰٫۰۲	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۵	-	-	-	-
FeO	۱۵٫۵۱	۱۵٫۷۵	۱۶٫۱۲	۱۷٫۲۰	۱۶٫۵۲	۱۶٫۱۷	۱۳٫۴۵	۱۳٫۷۷	۷٫۵۷	۷٫۲۱	۷٫۸۵	۸٫۰۴	۲۶٫۸۸	۲۶٫۹۰	۲۶٫۵۳	۲۶٫۶۳
MnO	۰٫۲۳	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۱۸	۰٫۱۹	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۵	۰٫۳۲	۰٫۳۱	۰٫۳۵	۰٫۲۵	۰٫۴۴	۱٫۵۸	۱٫۲۴	۱٫۶۴
MgO	۰٫۵۸	۰٫۵۷	۰٫۵۷	۰٫۴۲	۰٫۵۹	۰٫۶۰	۰٫۵۰	۰٫۵۳	۰٫۴۵	۰٫۵۰	۰٫۵۳	۰٫۶۹	۰٫۳۹	۰٫۱۷	۰٫۰۲	۰
CaO	۳۴٫۴۶	۳۴٫۳۴	۳۴٫۳۹	۳۳٫۵۲	۳۴٫۵۱	۳۳٫۸۳	۳۵٫۰۴	۳۴٫۹۸	۳۶٫۱۳	۳۶٫۰۳	۳۵٫۸۵	۳۶٫۱۷	۳۲٫۴۲	۳۲٫۳۵	۳۲٫۴۱	۳۲٫۲۳
Total	۱۰۰	۹۸	۹۸	۹۷	۹۹	۹۸	۹۹	۹۹	۱۰۰	۱۰۱	۹۹	۹۹	۹۹	۹۸	۹۹	۹۸
Almandine	۳	۰	۰	۱	۰	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۵	۲
Spessartine	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۴	۳	۴
Pyrope	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۲	۱	۰	۰
Grossular	۴۶	۴۲	۴۰	۳۷	۳۹	۴۱	۵۲	۵۰	۷۳	۷۵	۷۱	۶۸	۴	۴	۵	۶
Andradite	۴۹	۵۵	۵۷	۶۰	۵۸	۵۴	۴۵	۴۷	۲۶	۲۲	۲۸	۳۳	۹۱	۹۱	۸۷	۸۹
Uvarovite	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

Vesuvianite	Exoskarn												
Skarn	Proximal Zone				Distal Zone								
Sample no.	Ch.m.12				Ch.m.5								
Point.No	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۸	۲۹	۳۰
Na_2O	۰٫۰۴	۰	۰٫۰۴	۰	۰	۰	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۱	۰	۰	۰
K_2O	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۱	۰	۰	۰٫۰۱	۰	۰	۰	۰
MgO	۴٫۶۶	۴٫۷۷	۴٫۵۹	۵٫۰۶	۴٫۱۱	۴٫۹۶	۴٫۲۱	۵٫۷۸	۵٫۲۲	۵٫۶۵	۴٫۱۳	۳٫۹۵	۴٫۰۵
CaO	۳۴٫۹	۳۴٫۳	۳۵٫۱	۳۲٫۷	۳۶٫۵	۳۶٫۸	۳۶٫۹	۳۶	۳۷٫۱	۳۶٫۹	۳۶	۳۶٫۳	۳۶
MnO	۰٫۲۷	۰٫۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۴	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۴۲	۰٫۲	۰٫۰۸	۰٫۲۶	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۱۲
FeO	۷٫۴۷	۷٫۵۴	۷٫۳۶	۷٫۳۱	۱٫۳۷	۱٫۱۷	۲٫۴	۲٫۱۱	۰٫۸	۱٫۹۶	۳٫۰۵	۳٫۲۳	۳٫۱۱
Al_2O_3	۱۱٫۳	۱۱٫۶	۱۱٫۵	۱۱٫۹	۱۷٫۷	۱۶٫۸	۱۴٫۲	۱۴٫۷	۱۵٫۷	۱۳٫۶	۱۵٫۶	۱۵٫۱	۱۵٫۳
V_2O_3	۰٫۰۱	۰	۰٫۰۳	۰	۰	۰٫۰۱	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۱
Cr_2O_3	۰	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۱	۰
SiO_2	۳۴٫۹	۳۴٫۷	۳۴٫۸	۳۴٫۴	۳۶٫۶	۳۶٫۳	۳۶٫۶	۳۶٫۶	۳۷٫۲	۳۷٫۱	۳۶	۳۶٫۱	۳۶٫۲
TiO_2	۱٫۲۳	۱٫۱۷	۱٫۱۱	۱٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۱۰	۰	۰٫۲۰	۰٫۹۱	۱٫۹۵	۱٫۱
Total	۹۵	۹۴	۹۵	۹۳	۹۶	۹۶	۹۶	۹۵	۹۶	۹۶	۹۶	۹۷	۹۶

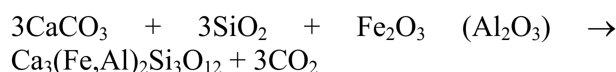
مقدار MgO این کانی در برون‌اسکارن نسبتاً یکنواخت است و تغییر چندانی ندارد (شکل ۵پ). کربنات بررسی شده در نمونه برون اسکارن کلسیت با محتوای MgO پایین است (wt٪< ۰٫۵).

توالی پاراژنزی‌دنباله حذف شود

تشکیل دوگانه و تشکیل اسکارن با شروع تبلور ماگما و آزاد شدن شاره‌های ماگمایی آغاز می‌شود. به دنبال سرد شدن توده‌ی نفوذی، شاره‌های غنی از آب خارج شده، به سمت محل تماس با سنگ‌های کربناتی مهاجرت کرده و با آن‌ها واکنش می‌کنند. این برهمکنش موجب آزاد شدن Ca و CO_2 می‌شود.

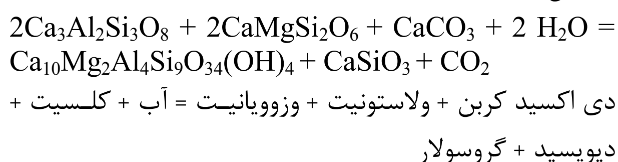
$$CaCO_3 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + CO_2 + H_2O \qquad [16]$$

بخشی از کلسیم آزاد شده به سمت توده‌ی نفوذی انتشار یافته و موجب تشکیل قشر باریکی از درون اسکارن می‌شود. در این مرحله گارنت غنی از آندرادیت همانند آنچه که درون اسکارن چالو مشاهده شد تشکیل می‌شود، زیرا این کانی به دماهای بالاتر و یا کسر مولی CO_2 بیشتر نیاز دارد [۱۷- ۱۹]. از طرف دیگر، نفوذ و مهاجرت شاره‌های دگرنهاد کننده به درون کربنات‌ها موجب تشکیل سیلیکات‌های آهن‌دار می‌شود. برون اسکارن چالو حاوی کلسیت، گارنت سری گراندیت با ترکیب گروسولار - آندرادیت، کلینوپیروکسن، ایدوکراز منیزیم-دار و ولاستونیت است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، گروسولار باید قبل از وزوویانیت تشکیل شده باشد. در چنین شرایطی، محلول جامد گروسولار- آندرادیت می‌تواند بر اساس واکنش پیشنهاد شده توسط [۲۰] تشکیل شده باشد.



$$3CaCO_3 + 3SiO_2 + Fe_2O_3\ (Al_2O_3) \rightarrow Ca_3(Fe,Al)_2Si_3O_{12} + 3CO_2$$

ترکیب شیمی گارنت موجود در برون اسکارن مورد بررسی دارای ترکیب جامد گروسولار-آندرادیت بوده و از $Ad_{27}Gr_{71}Py_2$ در بخش‌های بیرونی تا $Ad_{53}Gr_{43}Py_2$ در مجاورت محل همبری تغییر می‌کند (شکل۵ ب). از آنجا که آندرادیت از شاره‌های با شوری بالاتر و در فشار بیشتر XCO_2 و fO_2 و گروسولار در پاسخ به کاهش این دو متغیر تشکیل می‌شود [۲۱]، گفته می‌شود که در بخش‌هایی از درون اسکارن که به توده نفوذی نزدیک‌تر بوده است، شاره‌های شورتر بیشتر و فشار XCO_2 و fO_2 نیز بالاتر بوده است. بسیاری از بررسی‌های تجربی نشان داد که کانی‌های همیافت با وزوویانیت به شاره-های غنی از آب محدود شده‌اند [۲۲- ۲۴]. در مرمرهای کلسیتی بررسی شده، وزوویانیت‌های درشت بلور حاوی نفوذی-های فراوانی از گارنت، ولاستونیت و کلسیت است. مشاهده این نفوذی‌ها در زمینه‌ی پیرامون بلورهای درشت وزوویانیت، حاکی از آنست که کانی اخیر به خرج از بین رفتن گروسولار و دیوپسید و احتمالا بر اساس واکنش پیشنهاد شده توسط [۲۵] تشکیل شده باشد.



$$2Ca_3Al_2Si_3O_8 + 2CaMgSi_2O_6 + CaCO_3 + 2\ H_2O = Ca_{10}Mg_2Al_4Si_9O_{34}(OH)_4 + CaSiO_3 + CO_2$$

دی اکسید کربن + ولاستونیت + وزوویانیت = آب + کلسیت + دیوپسید + گروسولار

بر اساس کارهای تجربی، برای پیدایش وزوویانیت، دمای ۴۲۰ تا ۴۷۵ درجه سانتی‌گراد در فشار ثابت ۲ کیلوبار به‌دست آمده است [۲۶]. واکنش‌های مشابهی نیز توسط [۲۷] ارائه و اثبات شد که قلمرو پایداری وزوویانیت با افزایش فعالیت آب افزایش و همگام با افزایش فعالیت CO_2 کاهش می‌یابد. با

توجه به این بررسی‌ها، علارغم تولید CO_2، آب نیز باید در این سنگ‌ها نفوذ کرده باشد. در این اسکارن، فشار محلی CO_2 به منظور تشکیل وزوویانیت می‌تواند به دلایل زیر کاهش یافته باشد: ۱) نفوذپذیری پایین سنگ‌های محل تماس؛ ۲) حضور درزه‌ها و شکستگی‌های موجود که هم مسیر عبور شاره‌های کانه‌زا بوده و هم راهی برای خروج CO_2 اضافی را مهیا می‌سازند. ۳) اختلاط شاره‌های گرمابی و جوی. بررسی ریزدماسنجی میانبارهای شاره‌ی ذخیره چالو، فرایندهای آمیختگی و رقیق شدگی شاره‌ی کانه‌ساز طی اختلاط آب‌های ماگمایی-گرمابی و جوی را اثبات کرده است [۲]. بنابراین عامل آخر و یا ترکیبی از هر سه عامل می‌توانست موجبات تشکیل وزوویانیت را در مراحل نهایی تشکیل اسکارن فراهم آورد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، دنباله‌ی تشکیل دوگانه‌ی سنگ‌های اسکارن آهن چالو در شکل ۶ ترسیم شده است. گارنت و کلینوپیروکسن در مراحل دگرسانی پیشرونده و وزوویانیت و بخش اعظم کانه‌زایی طی دگرسانی قهقرایی تشکیل شده است. مجموعه روابط بافتی، کانیایی و پهنه‌بند شناسایی شده در اسکارن مورد بررسی، شباهت زیادی به سرشتی‌های بسیاری از اسکارن‌های مس را نشان می‌دهد [۲۸، ۲۹].

برداشت

شواهد صحرایی، نمونه‌برداری همنهشتی، بررسی مقاطع میکروسکوپی و نتایج حاصل از شیمی کانی‌ها، نشانگر یک منطقه‌بندی کانیایی از حاشیه‌ی توده‌ی نفوذی (درون‌اسکارن) به سنگ‌های میزبان آن (برون‌اسکارن) است. پهنه‌های شناسایی شده در اسکارن چالو به ترتیب بر حسب فاصله از خاستگاه گرماب و میزان XCO_2 و XH_2O تشکیل شده‌اند. الگوی پهنه‌بندی به‌دست آمده بازتاب عملکرد فعالیت‌های گرمابی در محل تماس سنگ‌های آهکی میزبان با توده‌ی نفوذی است که موجب تشکیل مجموعه کانی‌های متفاوت در مراحل مختلف تشکیل اسکارن شده است. کانی‌های بدون آب مانند گارنت غنی از آندرادیت و کلینوپیروکسن درون اسکارن در مراحل اولیه‌ی تشکیل اسکارن و همگام با دگرگونی مجاورتی در دماهای بالاتر و یا کسر مولی CO_2 متبلور شده است. این کانی به واسطه‌ی نفوذ کلسیم از سنگ‌های کربناتی تشکیل شده است. نفوذ شاره‌های غنی از آهن و سیلیس از توده‌ی نفوذی به سنگ‌های میزبان موجب تشکیل سیلیکات-های آهکی برون اسکارن شده است. در مرحله‌ی نهایی تشکیل اسکارن و دگرنهادی، وزوویانیت و مقادیر کمتر ولاستونیت به خرج گارنت و کلینوپیروکسن تشکیل شده‌اند. کانه‌زایی چالو نیز همزمان با نفوذ آب‌های سطحی اکسیژن‌دار به ژرفا و اختلاط با آب‌های ماگمایی با دمای بالای غنی از HF و HCl در شرایط فشار بالای اکسیژن و مقادیر پایین گوگرد آغاز شد و هماتیت تیغه‌ای و منتیت را تشکیل داده است. کانی‌های سولفیدی پیریت و کالکوپیریت نیز همزمان یا با اندکی تاخیر در این مرحله تشکیل شده‌اند.

شکل ۶ مراحل تشکیل و دنباله پاراژنتیکی کانی‌ها در اسکارن آهن چالو.

Mineral	Stage of skarn formation: Prograde	Stage of skarn formation: Retrograde	Supergene alteration
Clinopyroxene	▬		
Garnet	▬		
Wollastonite	▬	▬	
Vesuvianite		▬	
Hematite		▬	
Magnetite		▬	
Chalcopyrite		▬	
Pyrite		▬	
Malachite			▬
Limonite			▬
Goethite			▬

قدردانی

این پژوهش حاصل طرح پژوهشی به شماره ۲۱۰۲۵ است که با حمایت مالی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. همچنین نگارنده از آقایان دکتر فردین موسیوند و مهندس سید رضا میرباقری که به ترتیب در بررسی کانه نگاری و عملیات صحرایی اینجانب را همراهی کرده‌اند تشکر و قدردانی می‌کند.

مراجع

[۱] تقی‌پور ن.، قربانی ق.، درانی، م.، *"زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین مرتبط با ذخیره اسکارن آهن چالو (جنوب شرق دامغان)"*، مجلهٔ زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شمارهٔ ۲، جلد ۱ (۱۳۹۰) ص۵۴-۶۶.

[۲] مهرابی ب.، قاسمی سیانی م.، طالع فاضل الف.، *"بررسی سامانه کانه زایی فلزات پایه و گرانیها در محدوده های معدنی چشمه حافظ و چالو، کمان ماگمایی ترود -چاه شیرین"*، مجله علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۳ (۱۳۹۳) ص ۱۰۵-۱۱۸.

[۳] شیبی م.، مجیدی پ.، *"سازوکار جایگیری توده گرانیتوئیدی چالو با استفاده از روش فابریک مغناطیسی"*، مجله علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵ (۱۳۹۴) ص۸۷-۹۵.

[4] Alavi M., 1994, Tectonics of Zagros Orogenic belt of Iran, new data and interpretation. *Tectonophysics* 229, 211–238.

[5] Berberian F., Berberian M., *"Tectono-plutonic episodes in Iran"*. In: Gupta, H.K., Delany, F.M. (Eds.), Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution. Geodynamics Series, vol. 3. *American Geophysical Union*, Washington, D.C., pp.5–32 1981.

[۶] اشراقی س.، جلالی الف.، *"نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه معلمان"*، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، (۱۳۸۵).

[۷] کی‌نژاد آ.، پورکرمانی م.، رساله دکتری: *"تحلیل دینامیکی شکستگی‌های شمال منطقه ترود – معلمان"*، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (۱۳۸۷).

[8] Gill R., *"Igneous rocks and proceses a practical guide"*, Department of earth Sciences Royal Holloway University of London, (2010), 475p.

[9] Meyer C., Hemley J. J., *"Wall rock alteration", in* Barnes, H.L., ed., "Geochemistry of hydrothermal ore deposits: New York, Holt", Rinehart and Winston (1967) 166–235.

[10] Beane R. E., Titley S. R., *"Porphyry copper deposits part II: Hydrothermal alteration and mineralization",* Economic Geology 75th anniversary volume (1981) 235–269.

[11] Beane R. E., Titely S. R., *" Prphyry copper deposites",* Economic Geology 75th Anniv (1981) 214-269

[12] Montoy J. W., Hemley J. J., *"Activity relations and stabilities in alkali feldspar and mica alteration reactions",* Economic Geology 70 (1975) 577-594.

[13] Genter A., Traineau H., *"Analysis of macroscopic fractures in granite in the HDR geothermal well EPS-1, Soultz-sous-Forêts, France"*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 72 (1996) 121–141.

[14] Siivola J., Schmid R. *"Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks: List of mineral abbreviations"*. Web version 01.02.07. (http://www.bgs.ac.uk/scmr/docs/papers/paper_12.pdf) IUGS Commission on the Systematics in Petrology (2007).

[15] Meinert L. D., *"Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits: chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization"*. In: "Magmas, Fluids and Ore Deposits", Thompson, J.F.H. (Ed.), Mineralogical Association of Canada, Short Course Series 23 (1995) 400-418 .

[16] Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J., "Skarn deposits: Economic Geology", 75th Anniversary Volume (1981) 317–391.

[17] Bowman J. R., *"Basic aspects and applications of phase equilibria in the analysis of metasomatic Ca–Mg–Al–Fe–Si-skarns",* In: Lentz DR (ed) Mineralized intrusion-related skarn systems. Short Course Series 26 (1998) 1–49 (Mineral Assoc Canada, Ottawa, Ontario).

[18] Chenhall B. E, Mazaheri S. A., *"Skarn development from limestone adjacent to the Glenrock Granodiorite, Marulan Batholith, New South Wales, Australia",* Australian Journal of Earth Sciences 40 (1993) 485–500.

[19] Dúzs-Moore A., Leavens P.B., Jenkins I. I. R. E., Altounian N.M., *"Wollastonite at the Sterling Hill Fe–Zn–Mn ore body, Ogdensburg, New*

contact metamorphism on the chemistry of calcareous rocks in The Big Horse Limestone member, Notch peak, Utah", American Mineralogist 73 (1988) 1095–1110.

[25] Kerrick D. M., *"Review of metamorphic mixed-volatile (H_2O-CO_2) equilibria",* American Mineralogist 59 (1974) 729-762.

[26] Plyusnina L. P., Likhoydov G. G., *"Stability of vesuvianite in aqueous and H_2O–CO_2 fluids",* Geochemistry International 30 (1993) 644–654.

[27] Braitsch O., Chatterjee N. D., *"Metamorphe Mineralreaktionen in vesuvianfiihrender Gesteinen",* Beitrage fur Mineralogie und Petrographie 9 (1963) 353-373.

[28] Meinert L. D., Dipple, G. M., Nicolescu, S., *"World skarn deposits. Economic Geology",*100th Annivesary Volume (2005) 299-336.

[29] Ray G. E., *"A review of skarns in the Canadian Cordillera. British Columbia Ministry of Energy and Mines",* British Columbia Geological Survey Open File 8 (2013), 50p.

Jersey", Mineralogy and Petrology 79 (2003) 225–241.

[20] Best M. G., *"Igneous and Metamorphic Petrology",* New York: W.H. Freeman and Company, (1982) 630P.

[21] Taylor T.J., Liou J., *"The low-temperature stability of andradite in C-O-H fluids",* American Mineralogist 63 (1978) 378-393.

[22] Valley J. W., Peacor D.R., Bowman J.R., Essene E.J., Allard M.J., *"Crystal chemistry of a Mg-vesuvianite and implications for phase equilibria in the system CaO–MgO–Al_2O_3– SiO_2–H_2O–CO_2",* Journal of Metamorph Geology 3 (1985) 137–153.

[23] Abart R., *"Phase equilibrium and stable isotope constraints on the formation of metasomatic garnet-vesuvianite veins (SW Adamello, N Italy)",* Contributions to Mineralogy and Petrology 122 (1995) 116–133.

[24] Labotka T. C., Nabelek P. I., Papike J. J., Hover-Granath V. C., Laul J. C., *"Effects of*